

PEMANFAATAN MESIN PEMANAS INDUKSI UNTUK PENGGERASAN PERMUKAAN RODA GIGI PRODUK UKM

Rifky Ismail¹, M. Tauviquirrahman², Sugiyanto³, Jamari⁴,
Agung Warsito⁵ dan Abdul Syakur⁶

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, Kampus UNDIP Tembalang Semarang
Email: r_ismail@undip.ac.id

^{5,6} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, Kampus UNDIP Tembalang Semarang

ABSTRAK

Pemanasan induksi, yang selama ini telah digunakan dalam proses peleburan logam, merupakan sistem pemanasan yang sangat cepat dan efisien karena rugi-rugi radiasi dapat dikurangi. Pengerasan permukaan roda gigi menggunakan mesin pemanas induksi dilakukan dengan meletakkan roda gigi di dalam kumparan/coil yang dialiri arus listrik sehingga timbul medan magnet yang menghasilkan panas. Pemanasan secara kontinyu pada roda gigi hingga temperaturnya mencapai fase transformasi dan disertai dengan proses pendinginan cepat dapat menghasilkan pengerasan pada permukaan roda gigi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan alat pemanas induksi untuk proses pengerasan roda gigi UKM. Sistem rangkaian berbasis Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) dirancang untuk menghasilkan arus AC pada kumparan dengan frekuensi tinggi. Frekuensi kerja yang berkisar antara 30-80 KHz akan memberikan pemanasan yang terkonsentrasi pada permukaan roda gigi sehingga bagian dalam roda gigi tetap bersifat ulet sehingga mampu menahan beban puntir yang besar. Perubahan proses pemanasan yang dilakukan oleh UKM produsen roda gigi dari dapur peleburan atau dapur pemanas beralih pada mesin pemanas induksi dapat meningkatkan keseragaman dan ketepatan proses pemanasan roda gigi. Proses pemantauan dan pengukuran pemanasan menggunakan mesin pemanas induksi lebih mudah sehingga dapat membantu UKM membuat produk roda gigi yang lebih berkualitas dan seragam.

Kata Kunci: Pemanas induksi, Pengerasan roda gigi, UKM, Teknologi tepat guna

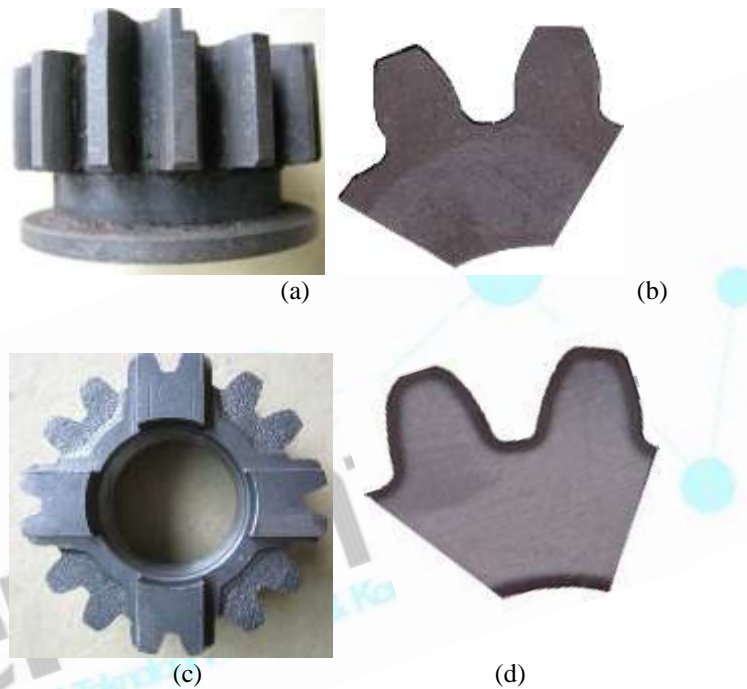
1. PENDAHULUAN

Upaya UKM untuk mengembangkan dan memasarkan produk roda gigi ke industri otomotif nasional terkendala oleh kualitas roda gigi yang dihasilkan. Saat ini, roda gigi telah dibuat oleh beberapa UKM yang bernaung di Klaster Komponen Otomotif yang tersebar di Juwana, Tegal dan Ceper, Klaten. Untuk mengetahui kualitas roda gigi produk UKM, Laboratorium Perancangan Teknik dan Tribologi, Jurusan Teknik Mesin UNDIP telah bekerja sama dengan UKM Klaster Komponen Otomotif di Juwana dan melakukan penelitian dengan membandingkan performansi roda gigi transmisi sepeda motor produk UKM dan produk OEM (*original equipment manufacturer*). Hasilnya, dari segi massa, geometri dan komposisi material, roda gigi UKM memiliki kualitas yang sama dengan roda gigi OEM, tetapi roda gigi UKM mengalami kegagalan ketika diuji ketahanan lelahnya. Roda gigi UKM mengalami deformasi plastik pada permukaannya ketika diuji hingga sekitar 1 juta siklus [1]. Salah satu faktor utama pada kegagalan tersebut disebabkan oleh rendah dan ketidakseragaman kekerasan permukaan roda gigi sebagai akibat kurangnya pemahaman UKM mengenai teknologi tribologi dan perlakuan panas dalam pembuatan roda gigi. Berdasarkan pengamatan di lapangan, beberapa UKM masih mengeraskan permukaan dengan cara memanaskan roda gigi menggunakan dapur peleburan (*furnace*) hingga berubah berwarna merah di permukaannya dan mencelupkannya ke media pendingin [2].

UKM yang lebih maju menggunakan *treatment furnace* untuk pengerasan roda gigi melalui mekanisme *pack carburizing*. Penelitian telah dilakukan untuk mencoba membuat perbandingan antara roda gigi produksi UKM yang telah mengalami *pack carburizing* menggunakan *treatment furnace* dan roda gigi buatan industri besar berskala nasional. Hasilnya terlihat pada Gambar 1 (a) yang menunjukkan roda gigi produk UKM dan Gambar 1 (b) yang menunjukkan pengerasan pada roda gigi UKM menggunakan metode *pack carburizing*. Gambar 1 (c) adalah contoh roda gigi buatan industri berskala nasional dan (d) pengerasan roda gigi industri nasional menggunakan metode *induction hardening*. Hasilnya sangat jelas

berbeda dimana pengerasan menggunakan metode *pack carburizing* terlihat masuk terlalu dalam ke tengah roda gigi sedangkan hasil *induction hardening* terlihat sangat rapi mengelilingi permukaan roda gigi [3].

Dari hasil pengamatan lapangan dan program pengabdian masyarakat yang telah dilaksanakan, disimpulkan bahwa terbatasnya transfer teknologi dari perguruan tinggi ke UKM sangat berperan pada rendahnya kualitas produk yang dibuat oleh UKM di Juwana. Untuk mengatasi hal ini, maka diperlukan suatu transfer teknologi tepat guna bagi UKM untuk meningkatkan kualitas produk roda gigi yang dihasilkan khususnya berkaitan dengan mengatasi kegagalan akibat deformasi plastis pada permukaan dan membuat produk roda gigi yang lebih homogen. Bentuk aplikasi teknologi yang ditawarkan adalah penggunaan mesin pemanas induksi untuk pengerasan permukaan roda gigi. Mesin pemanas induksi ini sebenarnya telah lazim digunakan dan diteliti dalam proses manufaktur roda gigi [4- 13]. Penelitian pendahuluan tentang pentingnya pembuatan lapisan pengerasan pada permukaan logam telah dilakukan sebelumnya menggunakan metode *finite element method* (FEM) [14-16].



Gambar 1: (a) Contoh roda gigi buatan UKM, (b) pengerasan pada roda gigi UKM menggunakan metode *carburizing* tungku, (c) contoh roda gigi buatan industri berskala nasional dan (d) pengerasan roda gigi industri nasional menggunakan metode *induction hardening* [3]

2. Pengerasan Roda Gigi

Proses pembuatan roda gigi diawali dengan proses pembentukan yang dilakukan dengan proses *casting* atau proses *machining*. Roda gigi yang telah terbentuk kemudian di *treatment* untuk menghasilkan permukaan yang lebih keras. Permukaan yang keras diperlukan untuk menahan deformasi saat roda gigi saling kontak dan mengurangi keausan saat roda gigi begesekan. Proses pengerasan roda gigi dapat dilakukan melalui beberapa proses: (a) *through hardening*, (b) *carburizing*, (c) *nitriding*, (d) *carbonitriding*, and (e) *induction hardening*. Pada akhirnya roda gigi dihaluskan permukaannya menggunakan metode *lapping* atau *grinding* [17].

Dari beberapa survey lapangan yang telah dilakukan, UKM hanya mampu melakukan 2 proses yang tersebut di awal, yaitu *through hardening* dan *carburizing*. Metode *carburizing* yang digunakan oleh UKM adalah *pack carburizing* dimana roda gigi dipanaskan hingga mencapai temperatur *austenite* dalam bejana yang berisi serbuk karbon. Metode *through hardening* dan *carburizing* ini memiliki beberapa 2 kelemahan. Yang pertama karena teknologi ini mengeraskan keseluruhan bagian dari roda gigi melalui proses pemanasan di dalam tungku peleburan atau tungku perlakuan panas sehingga proses pengerasan roda gigi

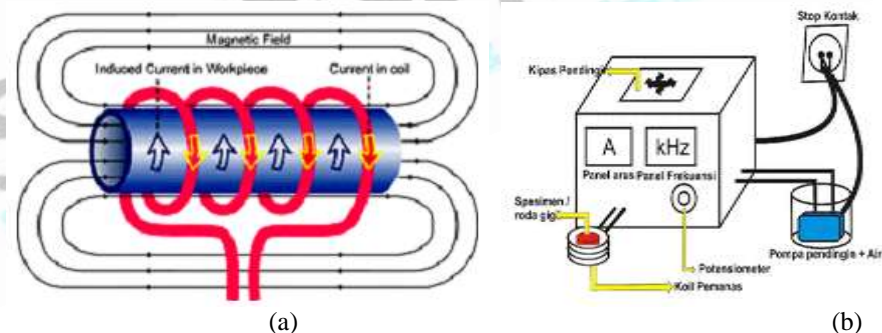
tidak hanya terjadi pada bagian permukaan tetapi hingga mencapai bagian dalam roda gigi. Bagian dalam roda gigi seharusnya dijaga agar tidak terlalu keras agar memiliki sifat keuletan yang tinggi dan mampu menahan beban impak dengan baik. Kelemahan yang kedua, tidak adanya aturan baku atau *standard operating procedure* (SOP) dan kontrol kualitas yang baik menjadikan hasil pengerasan roda gigi yang dilakukan tidak seragam. Gambar 2 menunjukkan alat perlakuan panas yang digunakan oleh UKM dalam proses pengerasan roda gigi, yaitu *treatment furnace* dan dapur peleburan.



Gambar 2: Alat pemanasan roda gigi UKM: (a) *treatment furnace* menggunakan pemanas elemen listrik dan (b) dapur peleburan

3. Pengerasan Menggunakan Metode Pemanasan Induksi

Paper ini akan membahas lebih dalam mengenai penggunaan *induction hardening* untuk pengerasan permukaan roda gigi sebagai upaya perbaikan kualitas roda gigi UKM. *Induction hardening* merupakan proses pemanasan menggunakan prinsip kumparan yang dialiri arus bolak-balik yang diletakkan disekitar bahan konduktif. Kumparan dan material konduktif akan menghasilkan medan magnet bolak-balik yang menghasilkan arus *eddy* [8]. Arus *eddy* yang mengalir di sekitar material konduktif menghasilkan panas pada material konduktif tersebut. Prinsip ini digunakan dalam pemanasan roda gigi dengan mengganti material konduktif tersebut dengan roda gigi. Gambar 3 (a) menunjukkan prinsip kerja dari arus *eddy* dan Gambar 3 (b) menunjukkan skema alat pemanas induksi yang akan dirancang.



Gambar 3: (a) Arus *eddy* pada permukaan material konduktif dan (b) skema rancangan alat pemanas roda gigi [3]

Pemanasan secara induksi memiliki karakteristik sebagai berikut: (a) kerapatan energinya tinggi, (b) pemanas induksi dapat berukuran kecil tetapi mampu melepaskan panas tinggi dalam waktu yang relatif singkat (c) pemanasan dapat dikendalikan pada suatu kedalaman tertentu sehingga tidak semua bagian terkena proses pemanasan. Kelebihan yang dimiliki oleh pemanasan induksi untuk pemanasan roda gigi adalah: (a) suhu dapat diatur secara tepat, (b) Tidak menghasilkan gas-gas sisa pembakaran, (c) Daerah roda gigi yang dipanaskan dapat ditentukan secara akurat, (d) mampu menghasilkan panas yang seragam pada setiap bagian roda gigi yang dipanaskan. Kekurangan yang dimiliki oleh teknologi ini adalah adanya harga yang cukup mahal [8].

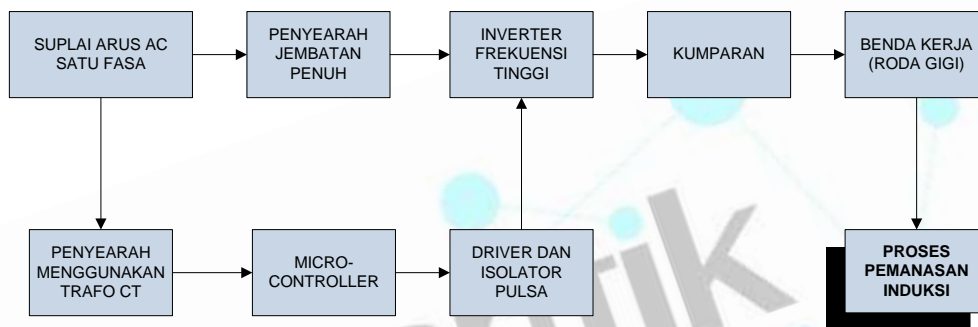
Berdasarkan survey kebutuhan mesin pemanas induksi untuk UKM sebagai teknologi tepat guna, disimpulkan bahwa mesin pemanas induksi untuk UKM diharapkan memiliki beberapa kriteria, yaitu memiliki kebutuhan energi listrik yang tidak terlalu besar, mudah digunakan, mudah perawatan dan

memiliki harga yang terjangkau [2]. Untuk itu, dilakukan penelitian untuk membuat suatu alat pemanas induksi untuk pengerasan roda gigi yang mampu memenuhi kriteria tersebut di atas. Salah satu komponen kontrol yang dipilih adalah *Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFET). Komponen ini dipilih karena memiliki harga yang terjangkau dan memerlukan catu daya yang rendah [3].

4. METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Perancangan Alat Pemanas Induksi

Skema rangkaian pemanas induksi yang dirancang terlihat pada Gambar 4 dimana terdapat beberapa bagian yang utama, yaitu rangkaian elektronika daya, rangkaian kontrol, kumparan dan alat pendingin [3]. *Power supply* sebagai pemasok arus AC pada alat pemanas induksi ini terdiri dari rangkaian penyearah gelombang penuh 1 fasa untuk menyearahkan sumber tegangan AC dari jala-jala dan rangkaian *inverter* resonan seri setengah jembatan frekuensi tinggi. Rangkaian kontrol terdiri atas: (a) penyearah dengan center tap, (b) rangkaian kontrol untuk pemicuan MOSFET dan sebagai pengatur frekuensi, dan (c) rangkaian *driver* dan isolator pulsa digunakan untuk pemicuan MOSFET serta memisahkan antara rangkaian kontrol dengan rangkaian daya. Sedangkan rangkaian daya terdiri atas: (a) penyearah tak terkontrol gelombang penuh, (b) rangkaian daya *inverter* resonan seri setengah jembatan frekuensi tinggi yang terdiri dari 2 buah MOSFET, (c) trafo penurun tegangan frekuensi tinggi dan (d) rangkaian resonan sendiri terdiri dari kapasitor, induktor, serta resistor yang ada pada beban.



Gambar 4: Blok diagramnya proses pemanasan induksi [3]

Hal penting yang perlu dipertimbangkan pada saat pembuatan kumparan pemanas adalah kapasitas arus yang akan digunakan, yang akan menentukan besarnya diameter kawat yang akan digunakan. Karena tahanan benda yang akan dipanaskan tidak diketahui, maka dipilih diameter kawat yang besar agar mampu dilewati arus besar. Pada alat pemanas induksi ini kawat pemanas yang dipilih adalah pipa tembaga dengan diameter 5 mm.



Gambar 5: Pemasangan kumparan pada gear [3]

Pendingin diperlukan untuk mendinginkan kapasitor, kumparan pemanas, serta rangkaian *inverter*. Pendingin kapasitor diperlukan karena pada saat alat pemanas induksi ini bekerja, kapasitor akan naik suhunya karena ada arus yang cukup besar mengalir pada kapasitor. Kapasitor dapat mengalami kegagalan apabila suhunya mencapai 125°C. Oleh karena itu diperlukan pendingin yang dapat meredam panas yang terjadi pada kapasitor. Kumparan pemanas perlu diberi pendingin karena suhu roda gigi yang di-*treatment* dapat mencapai 900°C sehingga akan terjadi radiasi panas dari roda gigi ke kumparan pemanas. Pendingin digunakan dengan cara memompakan air secara kontinyu dari bejana lalu ke dalam pipa tembaga. Air

tersebut disirkulasikan secara kontinyu di dalam pipa pemanas. Untuk rangkaian *inverter*, pendingin diperlukan sebagai pengatur panas untuk komponen *MOSFET* pada saat alat pemanas induksi bekerja.

4.2. Eksperimen Pemanasan Roda Gigi

Pada penelitian ini, terdapat dua rangkaian daya *inverter* resonan seri setengah jembatan frekuensi tinggi. Rangkaian yang pertama terdiri dari 2 buah *MOSFET* dan satu buah trafo *step down* untuk penurunan tegangan. Rangkaian yang kedua menggunakan 3 buah trafo *step down* dan 6 buah *MOSFET* yang dipararel dalam rangkaian *half bridge*. Pada kedua rangkaian, *MOSFET* yang digunakan adalah tipe IRFP 460.

Spesimen yang diuji pada alat pemanas induksi ini adalah specimen berupa silinder pipih diameter 65 mm dan ketebalan 7 mm dan roda gigi buatan UKM dengan diameter 62 mm, tebal 30 mm dan massanya 425 gr. Kedua specimen ini yang terbuat dari ST 60 dengan kadar karbon 0,517 %. Perbedaan dimensi roda gigi akan menghasilkan medan magnet yang berbeda saat arus eddy dialirkan sehingga kumparan pemanas roda gigi ini akan dirancang sesuai dengan dimensi roda gigi yang akan dipanaskan agar memiliki pemanasan yang optimal saat digunakan.

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 6 menunjukkan proses pemanasan roda gigi UKM menggunakan alat pemanas induksi yang telah dirancang. Specimen yang sedang dipanaskan adalah roda gigi UKM. Pada gambar tersebut terlihat beberapa unit utama dari mesin pemanas induksi, yaitu: alat pemanas, kumparan tembaga, dan pendingin. Alat ini mampu memanaskan roda gigi hingga mencapai temperatur 800 °C dalam waktu 5-7 menit.



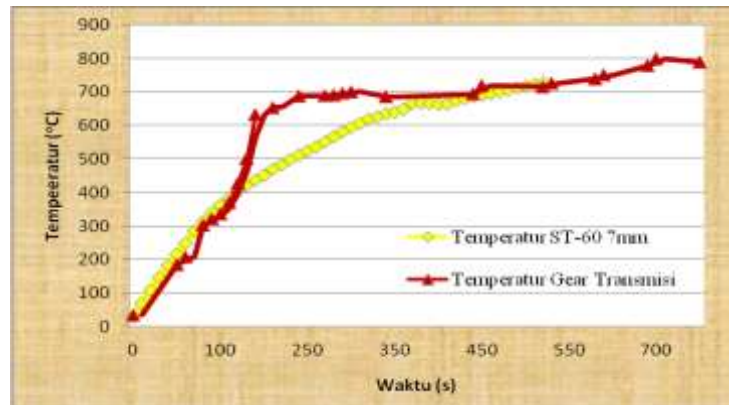
Gambar 6: Alat pemanas induksi saat bekerja [3]

Gambar 7 menunjukkan beberapa uji coba alat pemanas induksi menggunakan specimen yang berbeda, yaitu ST 60 bentuk silinder pipih dengan tebal 7 mm dan dalam bentuk roda gigi. Specimen silinder pipih dipanaskan menggunakan rangkaian inverter pertama dan specimen roda gigi dipanaskan menggunakan rangkaian inverter kedua. Pada uji coba yang pertama, temperatur maksimal yang dapat dicapai adalah 728 °C pada waktu 470 detik. *MOSFET* mengalami kegagalan setelah tercapainya temperatur tersebut.

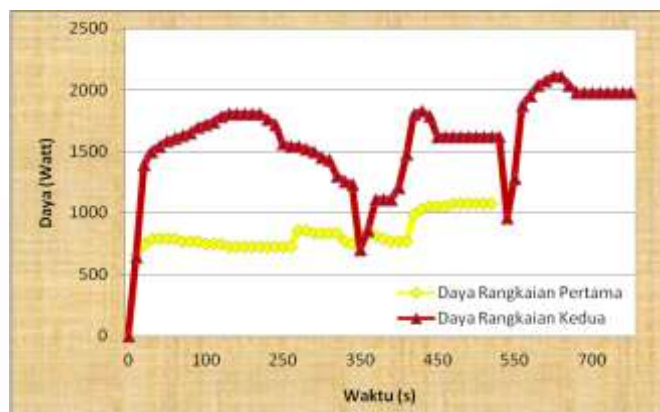
Pemanasan dilanjutkan dengan rangkaian inverter \kedua di mana penurunan arus dibagi menjadi 3 trafo *step down* dan menggunakan 6 buah *MOSFET*. Rangkaian ini mampu berfungsi lebih baik sehingga memiliki kenaikan temperatur yang lebih cepat dan mampu mencapai temperatur 800 °C setelah 700 detik. Pembagian kinerja trafo dan *MOSFET* pada rangkaian kedua dipandang memiliki daya tahan yang lebih baik dalam waktu dan proses pemanasan .

Pembahasan dilanjutkan dengan melihat perkembangan daya pada kedua rangkaian inverter saat bekerja. Grafik pada Gambar 8 menunjukkan bahwa pemanasan induksi dengan menggunakan rangkaian inverter kedua memiliki peningkatan daya yang lebih cepat dibanding rangkaian inverter pertama. Kenaikan daya yang cepat pada inverter kedua menjadikan temperatur pemanasan specimen roda gigi UKM meningkat tajam dari temperatur awal sebesar 34°C sampai temperatur 689°C dengan waktu yang dibutuhkan selama 240 detik. Daya pada rangkaian inverter sempat mengalami penurunan dari 1804 Watt menjadi 702 Watt pada waktu 350 detik dikarenakan frekuensi alat bergeser pada frekuensi yang tidak resonan sehingga dayanya tidak maksimal. Dengan mengatur potensiometer, alat akan kembali bekerja pada frekuensi resonannya sehingga dayanya kembali meningkat hingga 1827 Watt. Begitu juga penurunan yang kedua pada waktu 550 detik, diatasi dengan mengatur frekuensi resonannya. Perubahan frekuensi resonan ini

disebabkan adanya perubahan tahanan dari roda gigi akibat kenaikan temperatur. Dengan pengaturan potensiometer maka daya alat kembali meningkat hingga 2109 Watt pada frekuensi kerja berkisar 30 kHz.



Gambar 7: Kenaikan temperatur specimen saat dipanaskan [3]



Gambar 8: Grafik daya rangkaian inverter [3]

Teknologi tepat guna berupa mesin pemanas induksi ini masih memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk dapat diaplikasikan kepada UKM karena uji reliabilitas, dengan cara menggunakan mesin ini secara berulang untuk skala industri kecil belum dilakukan. Temperatur maksimal juga perlu ditingkatkan untuk mencapai temperatur austenisasi. Selain itu, penelitian lanjutan dengan meningkatkan frekuensi kerja dari 30 kHz menjadi 50 – 80 kHz menjadi fenomena yang menarik. Meski demikian, mesin pemanas induksi untuk skala lab ini telah terbukti mampu digunakan untuk menjawab kebutuhan industri yang menuntut adanya mesin pemanas yang memiliki kebutuhan energi listrik yang tidak terlalu besar, mudah digunakan, mudah perawatan dan memiliki harga yang terjangkau. Energi listrik yang berkisar 2000-3000 Watt masih dapat dijangkau oleh UKM. Selain itu alat ini memiliki kemudahan dalam pengoperasian dan perawatan.

6. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan teknologi tepat guna bagi UKM berupa mesin pemanas induksi untuk proses pengerasan roda gigi sebagai langkah perbaikan kualitas roda gigi produksi UKM. Teknologi tepat guna mesin pemanas induksi ini dirancang menggunakan sistem rangkaian berbasis *Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFET). Alat ini menghasilkan arus AC pada kumparan dengan frekuensi tinggi. Frekuensi kerja yang tinggi akan memberikan pemanasan yang terkonsentrasi pada permukaan (kulit) roda gigi sehingga bagian dalam roda gigi tetap bersifat ulet. Permukaan roda gigi yang keras diharapkan dapat menahan beban kontak dan keausan saat roda gigi bekerja sedangkan bagian dalam roda gigi diharapkan mampu menahan beban puntir yang besar.

Rangkaian yang lebih baik ditemukan pada rangkaian yang kedua menggunakan 3 buah trafo *step down* dan 6 buah MOSFET tipe IRFP 460 dalam rangkaian *half bridge*. Rangkaian ini mampu menghasilkan peningkatan temperatur yang lebih cepat dan mencapai temperatur maksimal yang lebih tinggi. Frekuensi terukur dari rangkaian ini adalah 30 kHz. Meskipun masih memerlukan langkah pengembangan dan penelitian lanjutan, mesin pemanas induksi untuk skala lab ini telah terbukti mampu digunakan untuk menjawab kebutuhan industri yang menuntut adanya mesin pemanas yang memiliki kebutuhan energi listrik yang tidak terlalu besar, mudah digunakan, mudah perawatan dan memiliki harga yang terjangkau

Perubahan proses pemanasan yang dilakukan oleh UKM produsen roda gigi dari penggunaan dapur peleburan atau dapur pemanas beralih pada mesin pemanas induksi dapat meningkatkan keseragaman dan ketepatan proses pemanasan roda gigi. Proses pemantauan dan pengukuran pemanasan menggunakan mesin pemanas induksi lebih mudah sehingga dapat membantu UKM membuat produk roda gigi yang lebih berkualitas dan seragam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi (DIKTI), Kementerian Pendidikan Nasional yang telah mendanai penelitian ini melalui Hibah Strategis Nasional Tahun 2010 dengan Nomor Kontrak: Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian Strategis Nasional Nomor: 513/SP2H/PP/DP2M/VII/2010, Tanggal 24 Juli 2010. Peneliti juga mengucapkan terima kasih kepada mahasiswa Jurusan Teknik Mesin dan Teknik Elektro Universitas Diponegoro yang telah membantu terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jamari, R.Ismail, dan M. Tauviquirrahman, *Peningkatan Kualitas Dan Daya Saing Roda Gigi Produk UKM Untuk Menembus Pasar Industri Otomotif Nasional*. Laporan Akhir Tahun Hibah Kompetitif Penelitian Untuk Publikasi Internasional DIKTI, 2009.
- [2] R.Ismail, *Penyuluhan Peningkatan Daya Saing Produk Industri Kecil dan Menengah (IKM) di Sentra Industri Kecamatan Juwana, Kabupaten Pati, Jawa Tengah*. Laporan Pengabdian kepada Masyarakat, Jurusan Teknik Mesin UNDIP, 2009.
- [3] R.Ismail, Jamari, M. Tauviquirrahman, dan A. Syakur, 2010, *Pengembangan dan Penerapan Mesin Pemanas Induksi untuk Pengerasan Permukaan Roda Gigi Produk UKM*. Laporan Akhir Tahun Hibah Strategis Nasional DIKTI, 2010.
- [4] W.-B. Kim dan S.-J. Na, "A study on residual stresses in surface hardening by high frequency induction heating," *Surface and Coatings Technology*, vol. 52, pp. 281-288, 1992.
- [5] H. Kristoffersen dan P. Vomacka, "Influence of process parameters for induction hardening on residual stresses," *Materials & Design*, vol. 22, pp. 637-644, 2001.
- [6] G. M. Maitra, *Handbook of Gear Design*, New Delhi: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1989.
- [7] K. Pantleon, O. Kessler, F. Hoffann, dan P. Mayr, "Induction surface hardening of hard coated steels," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 120, pp. 495-501, 1999.
- [8] V. Rudnev, D. Loveless dan R. Cook, *Handbook of Induction Heating*, NY: Marcel Decker, Inc, 2003.
- [9] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, dan M. Black, "Induction hardening of gears: A review part 1," *Heat Treatment of Metals*, pp. 11-15, 2003.
- [10] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, and M. Black, "Induction hardening of gears: A review part 2," *Heat Treatment of Metals*, pp. 97-103, 2003.
- [11] V. Rudnev, "Induction hardening of gears and critical components part 1," *Gear Technology*, pp. 47-53, 2008.
- [12] V. Rudnev, "Induction hardening of gears and critical components part 2," *Gear Technology*, pp. 58-63, 2008.
- [13] Y. Totik, R. Sadeler, H. Altun, dan M. Gavali, "The effects of induction hardening on wear properties of aisi 4140 steel in dry sliding conditions," *Materials & Design* vol. 24, pp. 25-30, 2003.
- [14] R. Ismail, M. Tauviquirrahman, Jamari and D.J. Schipper, "Finite element analysis of sliding contact of a hard cylinder on a layered elastic-plastic solid," *Proceedings of International Conference on Advances Mechanical Engineering (ICAME)*, Shah Alam, Malaysia, 2009.
- [15] R. Ismail, M. Tauviquirrahman, Jamari and D.J. Schipper, "The finite element study of static contact on multilayered solids," *The 6th International Conference on Numerical Analysis in Engineering*, Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia, 2009.
- [16] R. Ismail, M. Tauviquirrahman, Jamari and D.J. Schipper, "New material development for surface layer and surface technology in tribology science to improve energy efficiency," *American Institute of Physics Conference Proceedings* Vol. 1169, pp. 214-221, 2009.
- [17] A.K. Rakhit, *Heat Treatment of Gears: A Practical Guide for Engineers*. Materials Park, OH: ASM International Press, 2000.